مهندسی عمران شریف (پاییز ۱۳۹۸)
دوره‌ی ۲ - ۳۵، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۱۲۱-۱۲۸

Original Article

مطالعه‌ی تأثیر کلینوپتیلولایت در پارامترهای مقاومتی خاک رس ماسه‌دار و بررسی نحوه‌ی گسیختگی در آن

علی محمد رجبی * **(استادیار)**
دانشکده‌ی مهندسی زمین‌شناسی، دانشگاه تهران
شیما بخشی اردکانی (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه قم

در مطالعه‌ی حاضر، از نوعی زئولیت به نام کلینوپتیلولایت برای تثبیت و بهبود ویژگی‌های مقاومتی خاک رس ماسه‌دار استفاده شده است. به این منظور بر روی خاک رس ماسه‌دار تثبیت شده با کلینوپتیلولایت، آزمایش حدود اتربرگ در درصدهای ۰، ۵، ۱۵ و ۲۵ و نیز آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری در درصدهای ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ و در زمان‌های عمل‌آوری آنی ۷، ۱۴ و ۲۸ روز انجام شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد حد روانی و حد خمیری خاک با افزایش میزان افزودنی کلینوپتیلولایت به ترتیب ۳۰ و ۴۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین مقاومت تک‌محوری با افزایش درصد افزودنی کلینوپتیلولایت و زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد. بیشترین میزان افزایش مقاومت تک‌محوری مربوط به ۲۵٪ افزودنی و زمان ۲۸ روز است که نسبت به خاک تثبیت نشده، افزایش ۲٫۸۶ برابری داشته است. بررسی نحوه‌ی شکست نمونه‌ها نشان می‌دهد با گذشت زمان و افزایش درصد ماده‌ی افزودنی، نمونه‌ها ترد شده و بعد از گسیختگی، مقاومت تک‌محوری با سرعت بالایی کاهش یافته است. همچنین با افزایش زمان عمل‌آوری به دلیل تُرد شدن نمونه‌ها در اثر لخته شدن و جذب آب توسط کلینوپتیلولایت، سطوح شکست در نمونه‌ها واضح‌تر می‌شود.

واژگان کلیدی: رس ماسه‌دار، مقاومت تک‌محوری، حدود اتربرگ، کلینوپتیلولایت، بهسازی.

amrajabi@ut.ac.ir
shima.bakhshi@qom.ac.ir

۱. مقدمه

با توجه به اینکه شالوده‌ی بیشتر سازه‌ها بر روی خاک متکی است و درصورت پایین بودن مقاومت خاک موردنظر، سازه نیز مقاومت بالایی نخواهد داشت، لذا اصلاح خاک و بهسازی پارامترهای رفتاری آن، یکی از مسائل مهم در مهندسی ژئوتکنیک است. اضافه کردن برخی از افزودنی‌ها به خاک، به عنوان یکی از روش‌های مؤثر در بهبود مشخصه‌های رفتاری خاک، همواره مدنظر مهندسان ژئوتکنیک بوده است. زئولیت‌ها، کریستال‌های آلومیناسیلیکات هیدراته از عناصر گروه I و II جدول تناوبی به خصوص سدیم، پتاسیم، منیزیم، کلسیم، استرانسیم و باریم،[۱] و جامداتی بلورین با منافذ ریز هستند که اغلب حاوی کاتیون‌ها و مولکول‌های آب هستند و به علت تحرک نسبتاً زیاد کاتیون‌ها، تعویض آن‌ها به سهولت میسر است.[۲] سطح مخصوص بالا و وجود درزه در ساختار زئولیت به آن فعالیت پوزولانی می‌دهد، به‌طوری که مواد مذکور، توانایی واکنش با موادی نظیر آهک و تولید سیلیکات‌های کلسیم هیدرات (CSH) و کلسیم آلومینات (CAH) را دارند و در هر دو محیط خشک و آبی سخت می‌شوند.[۳] در سال‌های پیشین، پژوهش‌های بسیاری در زمینه‌ی استفاده از زئولیت‌های طبیعی یا مصنوعی به عنوان مواد پوزولانی برای تولید مخلوط‌های سیمانی انجام شده است.[۳،۴] برای اولین بار در سال ۱۹۹۱، از زئولیت به عنوان نوعی ماده‌ی پوزولانی که مقاومت سیمان را ضمن واکنش پوزولانی با کلسیم هیدروکسید افزایش می‌دهد، استفاده شد و بررسی‌ها نشان داد که واکنش پوزولانی در زئولیت‌های طبیعی بیشتر از خاکسترهای بادی و کمتر از سیلیس است.[۵] در برخی پژوهش‌ها نیز نشان داده شد که افزودنی‌های زئولیتی باعث افزایش سازگاری شیمیایی در خاک‌های کلسیم بنتونیت می‌شوند،[۶-۸] و همچنین زئولیت به طور گسترده به عنوان جاذب برای حذف آمونیوم و فلزات سنگین در خاک‌های شنی و بنتونیتی استفاده می‌شود.[۹-۱۱] همچنین در بررسی افزایش مهارآلاینده‌ها از طریق جذب با زئولیت و کربن فعال نشان داده شد که زئولیت‌ها به صورت قابل توجهی جاذب فلزات هستند.[۱۲،۱۳]

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۹/۱۹، اصلاحیه ۱۳۹۶/۱۱/۲۳، پذیرش ۱۳۹۶/۱۱/۲۹.
DOI:10.24200/J30.2018.5655.2258

در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی (۲۰۰۳) نیز در بررسی اثر زئولیت طبیعی در هیدراتاسیون سیمان نتیجه‌گیری شد که زئولیت به‌خوبی باعث ایجاد واکنش پوزولانی و همچنین به‌دلیل اختلاط آن با سیمان، منجر به مصرف کلسیم هیدروکسید و شکل‌گیری محصولات هیدراتاسیون (مانند سیمان) می‌شود.[۱۴] در سال ۲۰۱۱، نیز در مطالعاتی روی ساختار زئولیت و تأثیر نوع آن در پارامترهای مقاومتی خاک نشان داده شد که نوع زئولیت به صورت مشخص در پارامترهای هدایت هیدرولیکی و تراکم خاک‌های ماسه‌یی مؤثر است و همچنین هدایت هیدرولیکی بر حسب نوع افزودنی تا چند برابر افزایش پیدا کرده است.[۱۵]

سراج و همکاران (۲۰۱۶)، نیز به منظور بررسی چگونگی تأثیر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی زئولیت‌های طبیعی و اثر کلسیناسیون زئولیت در کارایی مخلوط‌های سیمانی، سطح ویژه‌ی نمونه‌هایی از زئولیت طبیعی و کلسینه شده را اندازه‌گیری کردند و سپس با انجام آزمایش‌های رئولوژیکی دوغاب، ویسکوزیته و تنش تسلیم دوغاب سیمان حاوی زئولیت‌های طبیعی و کلسینه شده نتیجه‌گیری کردند که کلسیناسیون ساختار زئولیت‌های طبیعی را از بین می‌برد و سطح ویژه‌ی آن‌ها را کاهش می‌دهد، که منجر به بهبود ویسکوزیته‌ی مخلوط و تنش تسلیم می‌شود.[۱۶] کاربرد زئولیت‌های طبیعی به عنوان جایگزین سیمان در بتن مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده است. برای نمونه، مارکیوه و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه‌ی خواص مکانیکی و دوام بتن‌های حاوی زئولیت، به بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن‌هایی حاوی ۱۰٪ زئولیت طبیعی و روان‌کننده پرداختند و نتایج آنها نشان داد بتن‌های با ۱۰٪ زئولیت طبیعی در مقایسه با بتن‌های بدون زئولیت، مقاومت فشاری ۹۰ روزه‌ی کمتری دارند، ولی مقاومت بتن ۱۸۰ روزه بیش از مقاومت بتن بدون زئولیت است. این نتایج همچنین نشان داد استفاده از یک روان‌ساز و حباب‌ساز در زئولیت به طور قابل توجهی اثربخش است و باعث ایجاد بتن‌های مقاوم در برابر نفوذ آب، خزش و یخ‌زدگی می‌شود.[۱۷]

همچنین ملاعباسی و شوش‌پاشا (۲۰۱۶)، در بررسی تأثیر زئولیت و سیمان در رفتار مکانیکی ماسه‌ی بادی، یک تابع نسبت تخلخل سیمان ـ زئولیت و مقاومت تراکم تک‌محوری ارائه کردند، که به عنوان روشی مناسب برای ارزیابی مقاومت فشاری تک‌محوری هر نوع مخلوط زئولیت ـ سیمان قابل استفاده است. همچنین نتایج نشان داد که جایگزینی زئولیت به جای سیمان، باعث افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری در خاک ماسه بادی می‌شود.[۱۸] در آزمایش‌هایی نیز در سال ۲۰۱۷، به‌منظور بررسی تأثیر آهک و سیمان در خصوصیات تورمی و حدود اتربرگ خاک رس سولفاته، از سه ترکیب تولید شده‌ی مختلف، شامل: رس‌سولفاته و آهک، رس‌سولفاته و سیمان و رس‌سولفاته و آهک و سیمان استفاده و پارامترهای درصد تورم، فشار تورم، حدروانی و حد خمیری آن‌ها قبل و بعد از اضافه کردن افزودنی‌ها مقایسه و با اضافه کردن ۳، ۵ و ۷ درصد آهک باعث افزایش فشار تورم، حد روانی و حد خمیری خاک شدند. افزودنی‌های مذکور به‌دلیل تشکیل ژل‌های سیمانی باعث کاهش درصد و فشار تورم، حد روانی و حد خمیری خاک شده‌اند. بنابراین اصلاح ویژگی‌های تورمی رس‌های در معرض هجوم سولفات با آهک امکان‌پذیر نبوده و استفاده از سیمان پرتلند تیپ II مناسب‌تر بوده است.[۱۹] همچنین گیدوبالدی و همکاران (۲۰۱۷)، واکنش‌پذیری نوعی خاک پیروپلاستیک با درصد بالای زئولیت را در مجاورت آهک بررسی کردند و نتایج نشان داد که افزودن آهک علاوه بر افزایش مقاومت برشی، اتساع‌پذیری خاک را نیز افزایش می‌دهد که این موضوع ناشی از شکننده شدن رفتار خاک است. خاک پیروپلاستیک بهسازی شده بعد از زمان ناچیزی از افزودن آهک، به علت وقوع واکنش پوزولانی، واکنش‌پذیری بالایی را در سطح ریزساختار نشان داد و نتیجه‌گیری شد که دلیل اصلی بهبود مکانیکی خاک، نقش اساسی زئولیت در تکامل فیزیکو ـ شیمیایی سیستم آب ـ خاک ـ آهک بوده است.[۲۰] ملاعباسی و همکاران (۲۰۱۶)، نیز اثر زئولیت در پارامترهای خاک ماسه ـ سیمانی را در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸، و ۹۰ روزه بررسی کردند و نتایج نشان داد میزان افزایش مقاومت تک‌محوری در زمان ۲۸ روز ۲۰ تا ۷۸ درصد و در۹۰ روز ۲۰ تا ۶۰ درصد است. همچنین میزان جذب آب در مخلوط‌های زئولیتی به مراتب بیشتر از مخلوط‌های سیمانی است.[۲۱]

مرور مطالعات پیشین نیز نشان می‌دهد علی‌رغم استفاده از افزودنی زئولیت در صنعت بتن و استفاده‌ی ترکیبی آن با سیمان یا آهک، مطالعات محدودی در خصوص بررسی تأثیر زئولیت در پارامترهای مقاومتی خاک و همچنین تأثیر زمان عمل‌آوری بر آن صورت گرفته است. بر این اساس در مطالعه‌ی حاضر، از بین انواع مختلف افزودنی‌ها، نوعی زئولیت به نام کلینوپتیلولایت (به دلیل ویژگی‌های منحصر به‌فرد فیزیکی و شیمیایی اعم از ظرفیت تبادل یونی بالا، جذب مایعات، سطوح ویژه‌ی بالا و سازگاری با محیط زیست) بررسی و ضمن انجام یک سری آزمایش‌های آزمایشگاهی، به تأثیر آن در خاک رس ماسه‌دار توجه شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. خصوصیات خاک و زئولیت مورد استفاده

خاک مورد مطالعه، ترکیبی از رس و ماسه‌ی فیروزکوه است. ماسه‌ی استفاده شده، رنگ سفید متمایل به زرد با چگالی ۲٫۶۸ کیلوگرم بر سانتی‌مترمکعب و ضریب گوشه‌داری کمتر از ۱٫۳ داشت. درصد عبوری ماسه‌ی بررسی‌شده از الک ۲۰۰، کمتر از ۱ بود و ترکیب شیمیایی آن در مطالعه‌ی حاضر در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین زئولیت استفاده شده در پژوهش حاضر از نوع کلینوپتیلولایت بوده و از معادن سمنان تهیه شده است. مشخصات فیزیکوشیمیایی کلینوپتیلولایت در جدول ۱ ملاحظه می‌شود.

به منظور طبقه‌بندی و رسم منحنی دانه‌بندی خاک، آزمایش دانه‌بندی مطابق استاندارد ASTM D۴۲۲-۶۳ [۲۲] انجام شد. شکل ۱، نمودار دانه‌بندی خاک مورد مطالعه را نشان می‌دهد. خاک مورد مطالعه از نوع رس ماسه‌دار بوده است که به صورت مصنوعی با ۵۲٪ رس و ۴۸٪ ماسه تهیه شده است. برای تعیین حد

جدول ۱. تجزیه‌ی عنصری ماسه‌ی فیروزکوه و کلینوپتیلولایت.

عناصر موجود	درصد عناصر	
	ماسه‌ی فیروزکوه	کلینوپتیلولایت
SiO_2	۹۷٫۵	۶۹٫۷۴
Al_2O_3	۰٫۹۵	۱۳٫۵۴
Fe_2O_3	۰٫۸۵	۱٫۲۶
CaO	۰٫۲۷	۲٫۴۵
MgO	۰٫۲۴	۰٫۸۷
K_2O	۰٫۱۹	-
Na_2O	-	۰٫۱۳
LOI	۰	۱۱٫۹۴

روانی، حد خمیری و شاخص خمیری خاک رس ماسه‌دار از آزمایش حدود اتربرگ بر طبق استاندارد ASTM D4318 [۲۳] استفاده شده است. نتایج آزمایش حدود اتربرگ، مقادیر حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری خاک مورد مطالعه را به ترتیب ۲۰٫۵، ۱۴٫۳۳ و ۶٫۱۸ درصد نشان داده است.

با توجه به نتایج آزمایش دانه‌بندی و حدود اتربرگ، نوع خاک مطابق سیستم طبقه‌بندی متحد رس لای‌دار با حد روانی پایین (CL-ML) نام‌گذاری شده است. برای تهیه‌ی نمونه‌ها، ابتدا بعد از خشک کردن رس و ماسه‌ی موردنظر به مدت ۲۴ ساعت درگرم‌خانه، رس با ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه مخلوط و ماده‌ی افزودنی به نسبت وزن مخصوص خشک خاک در درصدهای مختلف به خاک اضافه و مخلوط شدند. به منظور اعمال زمان عمل‌آوری، مخلوط نمونه‌ها در وزن مخصوص خشک بیشینه و رطوبت بهینه، آماده و تا زمان انجام آزمایش در ظروف دربسته نگهداری شدند.

۲.۲. آزمایش‌های آزمایشگاهی

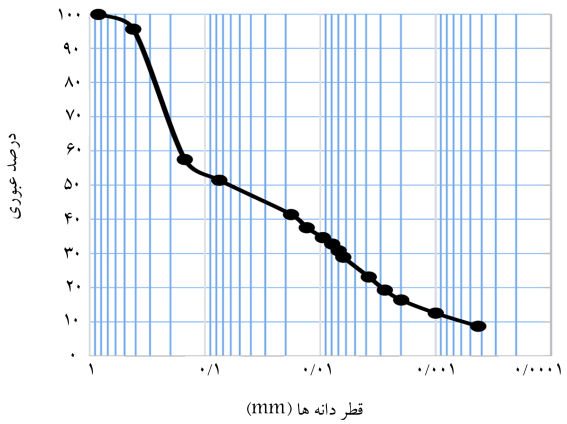
۱.۲.۲. آزمایش حدود اتربرگ

همان‌طور که پیشتر ذکر شد، در پژوهش حاضر برای تعیین حد روانی، حد خمیری، و شاخص خمیری خاک مورد مطالعه، آزمایش حدود اتربرگ بر طبق استاندارد ASTM D4318-93 انجام شده است. همچنین به منظور بررسی اثر افزودن کلینوپتیلولایت در خواص خمیری خاک، روی خاک تثبیت شده با ماده‌ی افزودنی ذکر شده در درصدهای ۵، ۱۵ و ۲۵، آزمایش حدود اتربرگ انجام شد.

۲.۲.۲. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، روشی سریع برای تعیین مقاومت زهکشی نشده‌ی خاک است. آزمایش مذکور برای خاک‌هایی قابل استفاده است که چسبندگی در آن‌ها به حدی باشد که نمونه‌های مورد آزمایش، پایداری مقاومت خود را بعد از حذف فشار همه‌جانبه حفظ کنند. در پژوهش حاضر، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری روی نمونه‌ی آماده شده در شرایط رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه مطابق دستورالعمل ASTM D2166-85 [۲۴] انجام شده است.

به این منظور، برای حصول وزن مخصوص خشک بیشینه، نمونه‌ها در ۵ لایه ریخته و کوبیده شدند. سپس آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری روی خاک تثبیت‌شده با افزودنی کلینوپتیلولایت با ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، و ۲۵ درصد وزن خشک خاک و در زمان‌های عمل‌آوری آنی (بلافاصله پس از اختلاط)، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز و در دمای محیط (۲۵ الی ۲۹ درجه سانتی‌گراد) انجام شده است.



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خاک رس ماسه‌دار.

۳. بحث و نتایج

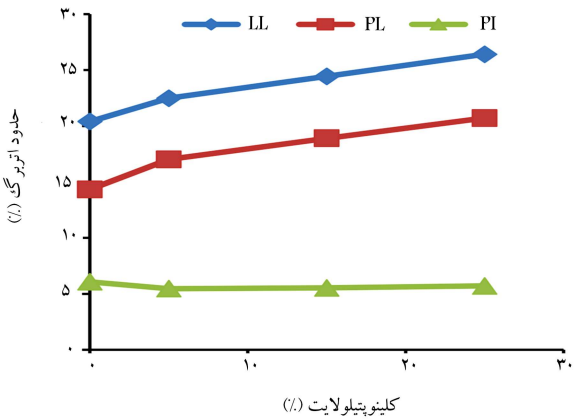
۱.۳. تأثیر کلینوپتیلولایت در حدود اتربرگ

نتایج آزمایش حدود اتربرگ خاک رس ماسه‌دار تثبیت نشده و تثبیت شده با ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد کلینوپتیلولایت در جدول ۲ ارائه شده است. شکل ۱، روند تغییرات حدود اتربرگ به ازاء درصدهای مختلف افزودنی را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۲، با افزایش میزان افزودنی، حد خمیری و حد روانی خاک افزایش می‌یابد. به‌علاوه شاخص خمیری در ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. شاخص خمیری خاک تثبیت‌شده در همه‌ی درصدها کمتر از خاک طبیعی بوده است. به‌طور کلی، تغییرات شاخص خمیری می‌تواند به دلیل افزایش میزان ریزدانه‌ی خاک، جذب آب توسط کلینوپتیلولایت و وقوع واکنش‌های شیمیایی باشد. اما با توجه به روش انجام آزمون حدود اتربرگ، مقدار اختلاف در نتیجه‌ی شاخص خمیری در اثر افزودن کلینوپتیلولایت، چندان قابل بحث نیست.

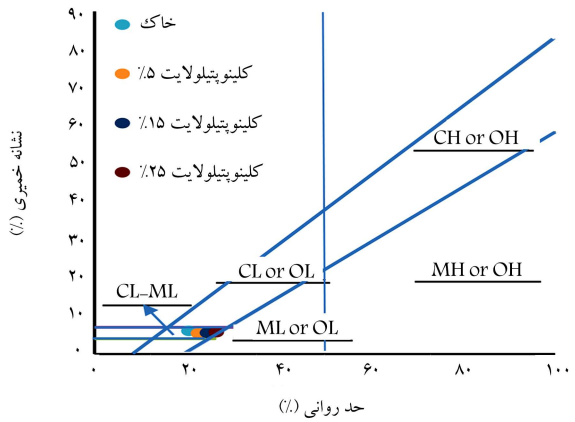
بررسی‌ها نشان می‌دهد به دو دلیل، اضافه کردن مواد پوزولانی به خاک، حد روانی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. دلیل اول، آهک آزاد موجود در پوزولان است که منجر به واکنش‌های کاتیونی و لخته شدن ذرات رس می‌شود. بر این اساس واکنش‌های کاتیونی، موجب کاهش ضخامت لایه‌ی مضاعف و در نتیجه کاهش حد روانی شده است و این عامل باعث لخته شدن ذرات رس می‌شود و در نتیجه ظرفیت نگهداری آب افزایش می‌یابد و موجب افزایش حد روانی می‌شود.[۲۵،۲۶] تقابل دو اثر ذکر شده‌ی اخیر، تغییرات حد روانی را در اثر اضافه کردن پوزولان تعیین خواهد کرد. در رس‌ها یا اثر لخته شدن غالب است که در این صورت آهک آزاد موجود در پوزولان، حد روانی خاک‌های رس را افزایش می‌دهد و یا اثر کاهش ضخامت لایه‌ی مضاعف غالب است و آهک آزاد، حد روانی آنها را کاهش می‌دهد.

جدول ۲. تغییرات حدود اتربرگ خاک تثبیت شده با کلینوپتیلولایت.

حدود اتربرگ	کلینوپتیلولایت (٪)			
	۰	۵	۱۵	۲۵
حد روانی (٪)	۲۰٫۴	۲۲٫۴	۲۴٫۴	۲۶٫۴
حد خمیری (٪)	۱۴٫۳	۱۷٫۱	۱۸٫۹	۲۰٫۷
شاخص خمیری (٪)	۶	۵٫۴	۵٫۵	۵٫۷



شکل ۲. تغییرات حدود اتربرگ خاک طبیعی و تثبیت شده با درصدهای متفاوت کلینوپتیلولایت.



شکل ۳. نمودار خمیری خاک طبیعی و تثبیت شده با کلینوپتیلولایت در درصدهای متفاوت.

دلیل دوم، اثر فیزیکی اضافه شدن پوزولان به محیط است. به عبارتی دیگر، اگر دانه‌های کلینوپتیلولایت درشت‌تر از دانه‌های خاک باشند، موجب کاهش حد روانی می‌شوند.[۲۵]

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد افزودن کلینوپتیلولایت به خاک مورد مطالعه، موجب تغییرات فیزیکی و افزایش ذرات ریز خاک می‌شود. افزایش ذرات ریز خاک، افزایش حد خمیری خاک را در پی دارد. از طرفی آهک آزاد موجود در خاک باعث وقوع واکنش‌های کاتیونی و لخته شدن می‌شود. با توجه به شکل ۲ می‌توان گفت تقابل اثرهای فیزیکی و شیمیایی افزودن کلینوپتیلولایت منجر به افزایش حد خمیری خاک می‌شود.

شکل ۳، نمودار خمیری خاک رس ماسه‌دار تثبیت شده با درصدهای مختلف کلینوپتیلولایت را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳، خاک رس ماسه‌دار در محدوده‌ی خاک‌های CL-ML قرار دارد و افزودن کلینوپتیلولایت به خاک مذکور، تغییرات کمی در شاخص خمیری خاک ایجاد کرده است. به طوری که درنهایت خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف کلینوپتیلولایت در همان محدوده‌ی خاک‌های CL-ML باقی مانده است.

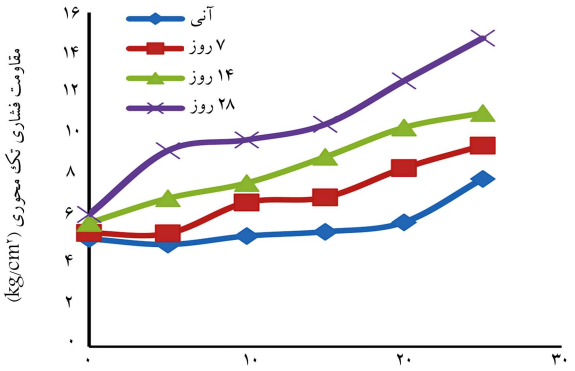
۲.۳. تأثیر کلینوپتیلولایت در مقاومت فشاری تک‌محوری

در ادامه، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری روی نمونه‌ی تثبیت نشده در دمای محیط (۲۵ تا ۲۹ درجه سانتیگراد) انجام شده است. بر این اساس، مقاومت فشاری تک‌محوری خاک تثبیت نشده، ۵/۱۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به‌دست آمد. سپس آزمایش روی نمونه‌های تثبیت شده با کلینوپتیلولایت در درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ و در زمان‌های آنی ۷، ۱۴ و ۲۸ روز انجام شد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری روی نمونه‌های تثبیت شده با کلینوپتیلولایت در جدول ۳ ارائه شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقاومت نمونه‌ها با افزایش درصد افزودنی و زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد. Al_2O_3 و SiO_2 موجود در کلینوپتیلولایت، (جدول ۱)، ترکیب‌هایی هستند که باعث تغییر در رفتار نمونه و وقوع واکنش‌های شیمیایی می‌شوند (به ترکیب‌های ذکر شده، ترکیب‌ها یا ذرات واکنشی می‌گویند). تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری، رابطه‌ی مستقیمی با میزان زئولیت و سیمان در نمونه دارد. به‌علاوه با افزایش میزان زئولیت و در نتیجه ذرات واکنشی Al_2O_3 و SiO_2 مقاومت فشاری تک‌محوری افزایش می‌یابد.[۲۷] بیشترین میزان افزایش مقاومت

جدول ۳. نتایج آزمایش تک‌محوری (kg/cm^2) روی خاک رس ماسه‌دار تثبیت شده با درصدهای متفاوت کلینوپتیلولایت در زمان‌های مختلف عمل‌آوری.

زمان عمل‌آوری	بدون افزودنی	درصد افزودنی				
		۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵
بلافاصله پس از اختلاط	۵/۱۵	۴/۸۸	۵/۲۹	۵/۴۹	۵/۹۵	۸/۰۳
۷ روزه	۵/۴۴	۵/۴۲	۶/۹	۷/۱۴	۵/۸۸	۹/۶۲
۱۴ روزه	۵/۹۲	۷/۰۹	۷/۸۳	۹/۰۸	۱۰/۴۹	۱۱/۱۹
۲۸ روزه	۶/۳۳	۹/۳۸	۹/۹	۱۰/۸۵	۱۲/۷۲	۱۴/۷۷



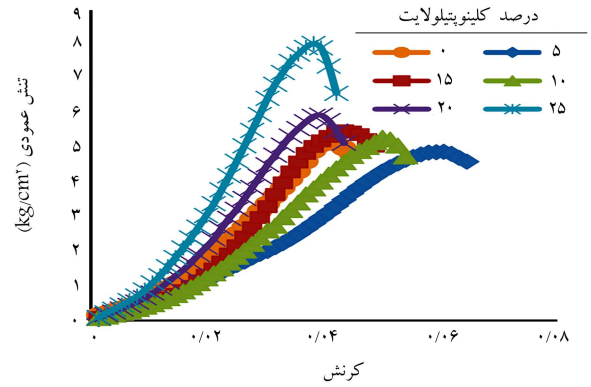
شکل ۴. نمودار مقاومت فشاری تک‌محوری نسبت به تغییرات درصد زئولیت در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت.

مربوط به ۲۵٪ افزودنی در زمان ۲۸ روز است که نسبت به خاک تثبیت نشده، مقاومت تک‌محوری ۲/۸۶ برابر افزایش داشته است.

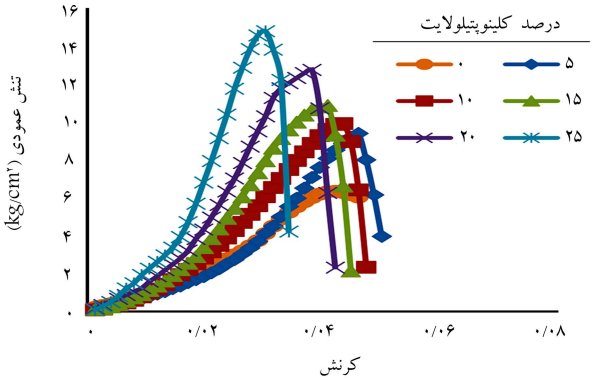
شکل ۴، تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری خاک موردمطالعه را نسبت به درصد کلینوپتیلولایت در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۴، نرخ افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها از ۱۵٪ افزودنی به بعد افزایش قابل ملاحظه‌یی داشته است. از طرفی مطابق با شکل ۴، از ابتدای زمان‌های عمل‌آوری، مقاومت فشاری افزایش داشته است. فاصله‌ی قائم بین نمودارها در فاصله‌های آنی تا ۷ روز، ۷ تا ۱۴ و ۱۴ تا ۲۸ روز تقریباً یکنواخت است و این موضوع نشان می‌دهد که واکنش‌های شیمیایی به طور یکنواخت در طی زمان عمل‌آوری رخ داده‌اند. واکنش‌های شیمیایی که در فرایند تثبیت خاک انجام می‌شود، وابسته به زمان هستند. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت در زمان‌های ابتدایی پس از اختلاط خاک با افزودنی کلینوپتیلولایت، واکنش‌های تجمع ـ تراکم و تبادل یونی با سرعت بالاتری انجام شده است، در حالی که با گذشت زمان، سرعت واکنش‌های پوزولانی بیشتر است.

۱.۲.۳. تأثیر زمان عمل‌آوری در مقاومت فشاری تک محوری و چگونگی گسیختگی نمونه‌ها

شکل‌های ۵ و ۶، به ترتیب منحنی تنش ـ کرنش آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری در زمان‌های آنی و ۲۸ روز را نشان می‌دهند که مطابق آن‌ها، با افزایش درصد کلینوپتیلولایت، نمونه‌ها تنش بیشتری را تحمل می‌کنند. مقایسه‌ی شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهد با گذشت زمان و افزایش مقدار افزودنی، نمونه‌ها کرنش کمتری را تحمل می‌کنند. همچنین با گذشت زمان، نرخ کاهش مقاومت در نمونه‌های حاوی کلینوپتیلولایت بعد از رسیدن به مقاومت نهایی بسیار بیشتر از نمونه‌های تثبیت نشده



شکل ۵. نمودار تنش ـ کرنش رس‌ماسه‌دار تثبیت شده با درصدهای مختلف زئولیت در زمان آنی.



شکل ۶. نمودار تنش ـ کرنش رس‌ماسه‌دار تثبیت شده با درصدهای مختلف زئولیت در زمان ۲۸ روزه.

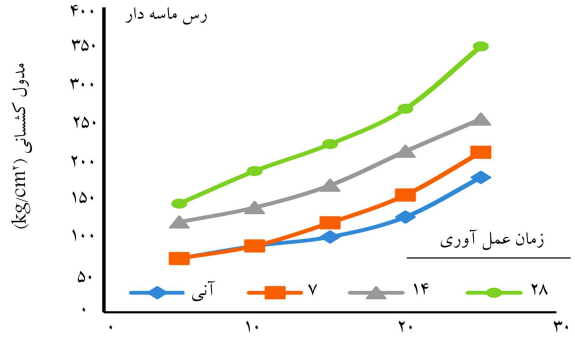
است. به‌عبارت دیگر، مقاومت در نمونه‌های حاوی کلینوپتیلولایت با شیب بیشتری نزول کرده است، به طوری که بعد از گذشت زمان کوتاهی، مقاومت نمونه‌ها تا ۰٫۱ مقدار خود کاهش یافته است؛ که علت آن احتمالاً جذب آب توسط ماده‌ی افزودنی است که باعث ترد شدن نمونه و شکست ناگهانی آن می‌شود. کلینوپتیلولایت به دلیل ویژگی‌های شیمیایی، سطح مخصوص بالا و نیمه پایداری به راحتی توانایی واکنش با آهک و تولید محصولات سیمانی (CSH) و (CAH) را دارد. همین موضوع باعث می‌شود تا محصولاتی با مقاومتی بالاتر حاصل شوند.[۲] همان‌طور که مشاهده می‌شود، در زمان‌های آنی و ۷ روزه مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با ۵٪ کلینوپتیلولایت، کمتر از خاک طبیعی است. در حالی که با گذشت زمان، به دلیل وقوع واکنش‌های شیمیایی با آهک آزاد موجود در خاک و جذب آب توسط کلینوپتیلولایت و ایجاد ساختار مجتمع، مقاومت نمونه‌ها افزایش می‌یابد. نتیجه اینکه در زمان ۲۸ روز، مقاومت فشاری تک‌محوری به طور قابل ملاحظه‌یی افزایش یافته است.

مقایسه‌ی شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهد با گذشت زمان ۲۸ روز، توانایی تحمل بار بعد از تنش نهایی وجود نخواهد داشت. این در حالی است که در زمان آنی، نمونه بعد از رسیدن به مقاومت نهایی، همواره توانایی تحمل تنشی نزدیک به تنش نهایی را دارد. بنابراین بارگذاری تا بیشینه‌ی تنش، در زمان ۲۸ روز توصیه نمی‌شود. چون بعد از زمان اندکی از گسیختگی، نمونه هیچ مقاومتی از خود نشان نمی‌دهد. به عبارت دیگر، بعد از شکست نمونه، نرخ کاهش مقاومت با افزایش زمان، افزایش قابل توجهی داشته است.

الف) آنی؛

ب) ۲۸ روز.

شکل ۷. سطح گسیختگی نمونه‌ی خاک رس ماسه‌دار تثبیت شده با ۲۵٪ کلینوپتیلولایت در زمان‌ها.



شکل ۸. نمودار تغییرات مدول کشسانی خاک رس ماسه‌دار.

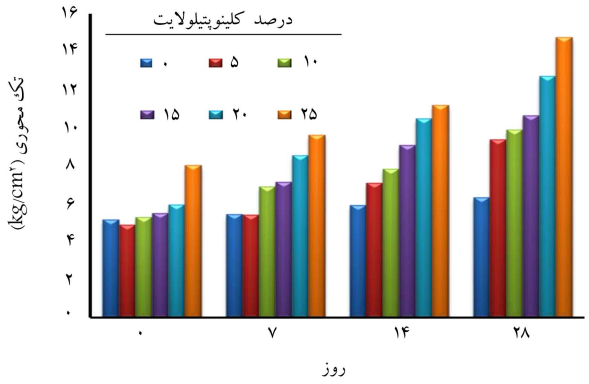
مطابق با شکل ۷الف، سطح شکست ایجاد شده بعد از گذشت زمان عمل‌آوری کاملاً واضح است و با چشم مشاهده می‌شود. این موضوع به علت ترد شدن نمونه‌ها در اثر لخته شدن و جذب آب توسط کلینوپتیلولایت است. در حالی که در زمان آنی (شکل ۷ب)، فقط ترک‌هایی در سطح نمونه ایجاد شده است. با مقایسه‌ی شکل‌های ۷الف و ۷ب می‌توان دریافت که نمونه در زمان آنی بعد از تحمل تنش نهایی، فقط دچار گسیختگی موضعی شده است و فقط روی قسمت‌هایی از نمونه ترک مشاهده می‌شود؛ در حالی که در زمان ۲۸ روز، خاک دچار گسیختگی کلی می‌شود و خط گسیختگی به صورت واضحی مشاهده می‌شود. بنابراین در نمونه‌های ۲۸ روزه به علت گسیختگی کلی، توانایی تحمل تنش کاملاً از بین می‌رود؛ در حالی که در زمان آنی به علت گسیختگی موضعی (و نه کامل)، خاک همواره توانایی تحمل بارکمتری نسبت به بار متناظر با تنش بیشینه دارد. تصاویر شکست نمونه‌ها، نتایج نمودارهای تنش ـ کرنش را به خوبی تأیید می‌کنند (شکل ۷).

در شکل ۸، نیز نمودار مدول کشسانی خاک رس ماسه‌دار در درصدهای متفاوت و زمان‌های عمل‌آوری مختلف مشاهده می‌شود که مطابق آن مدول کشسانی خاک با افزایش میزان افزودنی و گذشت زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد. افزایش مدول کشسانی به دلیل وقوع واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی اتفاق می‌افتد. جذب آب بالای کلینوپتیلولایت، یکی از علل فیزیکی افزایش مدول کشسانی است که این

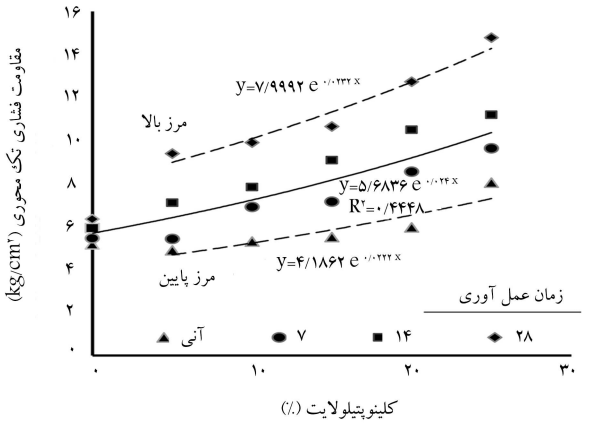
افزایش در نتیجه‌ی کاهش کرنش شکست به وقوع می‌پیوندد. همچنین واکنش‌های شیمیایی، اعم از پوزولانی و تبادل یونی باعث افزایش مدول کشسانی شده‌اند. افزایش مدول کشسانی، خود دلیلی بر افزایش تردشدگی در نمونه‌هاست. بیشترین میزان افزایش مدول کشسانی مربوط به ۲۵٪ افزودنی و زمان ۲۸ روز است، که نسبت به خاک تثبیت نشده نزدیک به ۴ برابر افزایش داشته است. افزایش مدول کشسانی در نتیجه‌ی افزایش درصد کلینوپتیلولایت ناشی از خاصیت جذب آب توسط آن و همچنین افزایش سختی با گذشت زمان به علت وقوع هر دو اثر فیزیکی و شیمیایی است.

شکل ۹، تغییرات درصد افزایش مقاومت در زمان‌های متفاوت را به ازاء درصدهای متفاوت کلینوپتیلولایت نشان می‌دهد که مطابق آن در زمان ۲۸ روز، افزودن ۰ تا ۲۵ درصد کلینوپتیلولایت به خاک، بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت فشاری دارد و به ترتیب تأثیر ذکر شده در زمان‌های کمتر، کاهش می‌یابد. به طوری که در زمان آنی، تغییر زیادی در درصد افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری ملاحظه نمی‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با کاهش زمان، تأثیر افزایش کلینوپتیلولایت در درصد افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، در زمان‌های کمتر، عملکرد کلینوپتیلولایت در افزایش مقاومت، کاهش می‌یابد.

شکل ۱۰، پراکندگی مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس ماسه‌دار را به ازاء درصدهای متفاوت کلینوپتیلولایت در زمان‌های مختلف عمل‌آوری نشان می‌دهد که مطابق آن، رابطه‌ی ۱ به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری



شکل ۹. چگونگی تغییر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس ماسه‌دار به ازاء زمان‌های عمل‌آوری مختلف در درصدهای مختلف کلینوپتیلولایت.



شکل ۱۰. رابطه‌ی تجربی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری به ازاء درصدهای مختلف کلینوپتیلولایت.

خاک رس ماسه‌دار تثبیت شده با افزودنی کلینوپتیلولایت به ازاء درصدهای متفاوت افزودنی پیشنهاد شده است:

$$y = ۵/۶۸۳۶e^{۰/۰۲۴x} \qquad (۱)$$

که در آن، x درصد افزودنی و y مقاومت فشاری تک‌محوری بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع است.

رابطه‌ی ۱، هر چند دقیق نیست، اما به خوبی معرف روند تغییر مقاومت فشاری تک‌محوری به ازاء درصدهای افزودنی مورد بررسی در مطالعه‌ی حاضر است.

در مطالعه‌ی حاضر تلاش شده است تا با بررسی تأثیر افزودن پوزولان طبیعی کلینوپتیلولایت در پارامترهای مقاومتی خاک از مصالح بومی سازگار با محیط زیست با هزینه‌ی اندک استفاده شود. کلینوپتیلولایت در صنایع مختلف، از جمله: کشاورزی، دارویی، متالوژی و پتروشیمی کاربرد دارد. در مهندسی ژئوتکنیک، اما کمتر به آن توجه شده است. با توجه به هزینه‌ی پایین افزودنی کلینوپتیلولایت نسبت به افزودنی‌های دیگر، از یک طرف و فراوانی طبیعی آن از نقطه‌نظر زمین‌شناسی از طرف دیگر، در صورت تجاری‌سازی محصول مذکور، قیمت آن نسبت به سایر افزودنی‌ها به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، برای بهسازی ۱ تن خاک با ۲۵٪ افزودنی در شرایط کنونی، هزینه‌یی حدود ۳۷۵۰۰ تومان نیاز است که در صورت تجاری‌شدن آن، امکان کاهش قیمت تا ۱۲۵۰۰ تومان نیز وجود خواهد داشت. بنابراین، افزودنی کلینوپتیلولایت از دو جنبه‌ی اقتصادی و سازگاری با محیط زیست نسبت به سایر افزودنی‌ها بی‌رقیب خواهد بود.

۴. نتیجه‌گیری

مشخصات برخی از خاک‌ها، از قبیل توان باربری پایین و نشانه‌ی خمیری بالا باعث می‌شود تا انجام عملیات عمرانی بر خاک‌های مذکور ناممکن و غیراقتصادی باشد. یکی از راه‌های رفع مشکل ایجاد شده، اصلاح و تثبیت خاک است. در مطالعه‌ی حاضر، اثر افزودنی کلینوپتیلولایت در پارامترهای مقاومتی خاک رس بررسی شد. بر این اساس، آزمایش حدود اتربرگ روی خاک رس تثبیت شده با کلینوپتیلولایت در درصدهای ۰، ۵، ۱۵ و ۲۵ و آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری در درصدهای ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۵ و در زمان‌های آنی، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز روی خاک انجام شد. نتایج حاصل از آزمایش حدود اتربرگ نشان داد افزودن کلینوپتیلولایت به خاک رس ماسه‌دار موجب افزایش حد روانی خاک می‌شود. کلینوپتیلولایت موجب تغییرات فیزیکی و به عبارتی افزایش درصد ریزدانه‌ی خاک و در نتیجه افزایش حد خمیری خاک می‌شود. از طرفی آهک آزاد موجود در خاک، باعث وقوع واکنش‌های کاتیونی و کاهش حد خمیری می‌شود. در نتیجه، تقابل اثر فیزیکی و شیمیایی افزودن کلینوپتیلولایت منجر به افزایش حدود خمیری خاک شده است. به طورکلی، نمودار خمیری خاک تثبیت شده با کلینوپتیلولایت نشان می‌دهد تغییرات نشانه‌ی خمیری تقریباً ناچیز است و ساختار اصلی خاک در اثر افزودن تثبیت کننده، ثابت می‌ماند.

نتایج حاصل از آزمایش تک‌محوری نشان می‌دهد با افزایش میزان کلینوپتیلولایت و افزایش زمان عمل‌آوری مقاومت فشاری خاک افزایش می‌یابد. علت افزایش مقاومت تک‌محوری با افزایش درصد افزودنی، افزایش ذرات واکنشی $Al_۲O_۳$ و $SiO_۲$ موجود در کلینوپتیلولایت است. همچنین گذشت زمان عمل‌آوری باعث وقوع واکنش‌های شیمیایی و در نتیجه افزایش مقاومت می‌شود. بیشترین میزان افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری مربوط به ۲۵٪ افزودنی و زمان ۲۸ روز است که نسبت به خاک تثبیت

نشده در زمان آنی افزایش ۲٫۸۶ برابری داشته است. روند افزایش مقاومت در طول زمان عمل‌آوری، تقریباً یکنواخت است و این موضوع می‌تواند به دلیل یکنواختی وقوع واکنش‌های شیمیایی در طی زمان عمل‌آوری باشد. با گذشت زمان، نرخ کاهش مقاومت در نمونه‌های حاوی کلینوپتیلولایت بعد از رسیدن به مقاومت نهایی بیشتر از نمونه‌های تثبیت نشده است، این موضوع به دلیل افزایش سختی خاک در اثر افزودن کلینوپتیلولایت و تردشدگی نمونه‌هاست. همچنین میزان جذب آب در مخلوط‌های زئولیتی به مراتب بیشتر از مخلوط‌های سیمانی است،[۲۱] که این خود باعث افزایش تردی نمونه‌ها و شکنندگی آن‌ها می‌شود. به طورکلی باگذشت زمان، نرخ کاهش مقاومت بعد از شکست، افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زمان عمل‌آوری، نمونه‌ها تردتر و درکرنش‌های کمتر، گسیخته می‌شوند، به‌علاوه باگذشت زمان، سطح گسیختگی به صورت کاملاً واضحی مشاهده می‌شود. در ادامه‌ی مطالعه‌ی حاضر، پیشنهاد شده است اثر افزودنی کلینوپتیلولایت در پارامترهای تحکیمی خاک تثبیت شده با آن، پتانسیل رمبندگی و تورم‌پذیری خاک بررسی شود. به‌علاوه اثر انواع مختلف زئولیت و تأثیرشان در پارامترهای مقاومتی خاک می‌تواند موضوعی برای پژوهش‌های آینده باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان نوشتار حاضر، مراتب تقدیر و تشکر خود را از پرسنل محترم شرکت ایران خاک به خصوص جناب آقای مهندس بصیر، مدیر عامل محترم شرکت، به جهت در اختیار قرار دادن تجهیزات آزمایشگاهی و شرکت افرازند به جهت در اختیار قرار دادن کلینوپتیلولایت، اعلام می‌دارند.

منابع (References)

1. Gottary, G. and Galli, E. "Natural Zeolite", Springer, Berlin, pp. 210-215 (1985).
2. Mallah, M. "Study of the structure and properties of ion exchange of a zeolite type", Master's Thesis, TU (1998).
3. Colella C. "Natural zeolites for environmentally friendly processes and applications", In: Kiricsi I, Borbely G., Nagy, J.B.and Karge, H.G. editors, Porous Materials in Environmental Friendly Processes (Studies in Surface Science and Catalysis 125), Amsterdam, Elsevier, pp. 641-655 (1999).
4. Liguori, B., Caputo, D. and Iucolano, F. "Fiber-reinforced lime-based mortars: Effect of zeolite addition", *Construction and Building Materials*, **77**, pp. 455-460 (2014).
5. Feng, N., Li, G. and Zang, X. "High strength and flowing concrete with a zeolite mineral admixture", *Cement, Concrete and Aggregate*, **12**(2), pp. 61-69 (1991).
6. Kaya, A. and Durukan, S. "Utilization of bentonite-embedded zeolite as clay liner", *Applied Clay Science*, **25**(1), pp. 83-91 (2004).
7. Jin, F., Fan, R.D. and Du, Y.J. "Application of soil bentonite amended with zeolite for cutoff wall backfill in land contaminated remediation", *Proceedings of the 7th International Symposium on Lowland Technology*, Saga, Japan (2010).
8. Oren, A.H., Kaya, A. and Kayalar, A. "Hydraulic conductivity of zeolite-bentonite mixtures in comparison with sand-bentonite mixtures", *Can. Geotech.*, **48**(9), pp. 1343-1353 (2011).
9. Turan, N.G. and Ergun, O.N. "Removal of Cu (II) from leachate using natural zeolite as a landfill liner material", *Journal of Hazardous Materials*, **167**(1), pp. 696-700 (2009).
10. Hamidpour, M., Kalbasi, M., Afyuni, M. and et al. "Sorption hysteresis of Cd(II) and Pb(II) on natural zeolite and bentonite", *Journal of Hazardous Materials*, **181**(1), pp. 686-691 (2010).
11. Delkash, M., Ebrazi Bakhshayesh, B. and Kazemian, H. "Using zeolitic adsorbents to cleanup special wastewater streams: A review", *Microporous and Mesoporous Materials*, **214**, pp. 224-241 (2015).
12. Malusis, M.A., Barben, E.J. and Evans, J.C. "Hydraulic conductivity and compressibility of soil-bentonite backfill amended with activated carbon", *Geotech. Geoenviron.*, **135**(5), pp. 664-672 (2009).
13. Hong, C.S., Shackelford, C.D. and Malusis, M.A. "Consolidation and hydraulic conductivity of zeolite amended soil-bentonite backfills", *Geotech. Geoenviron.*, **138**(1), pp. 15-25 (2011).
14. Perraki, T., Kakali, G. and Kontoleon, F. "The effect of natural zeolites on the early hydration of Portland cement", *Microporous and Mesoporous Materials*, **61**(1), pp. 205-212 (2003).
15. Hong, C.S., Shackelford, C.D. and Malusis, M.A. "Consolidation and hydraulic conductivity of zeolite amended soil-bentonite backfills", *Geotech. Geoenviron.*, **48**(9), pp. 15-25 (2011).
16. Seraj, S., Ferron, R.D. and Juenger, M.C.G. "Calcining natural zeolites to improve their effect on cementitious mixture workability", *Cement and Concrete Research*, **85**, pp. 102-110 (2016).
17. Markiv, T., Sobol, K., Franus, M. and et al. "Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **16**(4), pp. 554-562 (2016).
18. Mola-Abasi, H. and Shooshpasha, I. "Influence of zeolite and cement additions on mechanical behavior of sandy soil", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **8**(5), pp. 746-752 (2016).
19. Cheshomi, A., Eshaghi, A. and Hassanpour, J. "Effect of lime and fly ash on swelling percentage and Atterberg limits of sulfate-bearing clay", *Applied Clay Science*, **135**, pp. 190-198 (2017).

20. Guidobaldi, G., Cambi, C., Cecconi, M. and et al. "Multi-scale analysis of the mechanical improvement induced by lime addition on a pyroclastic soil", *Engineering Geology*, **221**, pp. 193-201 (2017).

21. Mola-Abasi, H. and Kordtabar, B. "Effect of natural zeolite and cement additive on the strength of sand", *Geotech Geol. Eng.*, **34**(5), pp. 1539- 1551 (2016).

22. ASTM D422-63, "Standard test method for particle-size analysis of soil", ASTM International, West Conshohocken, PA (2007).

23. ASTM D4318, "Standard test methods for liquid limit. plastic limit, and plasticity index of soils", (1998 Edition)

24. ASTM D2166-85, "Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil", (1985 Edition).

25. Sivapullaiah, P.V. and Prashansth, J.P. "Effect of fly ash of the index properties of black cotton soil", *Soils and Foundations*, **36**(1), pp. 97-103 (1996).

26. Matoes, M. "Soil lime research at iowa state university", *Soil and Foundations*, **90**(SM-2), pp. 127-153 (1964).

27. Mola-Abasi, H., Khajeh, A. and Naderi Semsani, S. "Porosity/(SiO2 and Al2O3 particles) ratio controlling compressive strength of zeolite-cemented sands", *Geotech. Geol. Eng.*, **36**(2), pp. 949-958 (2017).